中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 1 期: 131 ~ 142
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

改进的南极洲陆地卫星影像镶嵌图

惠凤鸣[①②], 程晓[①②*], 刘岩[①②], 张艳梅[③], YuFang YE[④], 王显威[①], Zhan LI[⑤], 王坤[①②], 詹志飞[①②], 虢建宏[①], 黄华兵[①], 李秀红[①②], 郭子祺[①], 宫鹏[①]

① 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所, 北京 100875;
② 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875;
③ 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
④ Institute of Environmental Physics, University of Bremen, Bremen 28359, Germany;
⑤ Department of Geography & Environment, Boston University, MA 02215, USA
* 联系人, E-mail: xcheng@bnu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-16; 接受日期: 2012-06-25
国家海洋局极地考察办公室、国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB957704)、国家高技术研究发展计划项目(编号: 2008AA121702, 2008AA09Z117)、国家自然科学基金(批准号: 41106157, 41176163)和遥感科学国家重点实验室开放基金(编号: OFSLRSS201005)资助

摘要 研究改进 LIMA 数据处理方法, 使用 1073 景 Landsat7-ETM+数据制作了改进的南极洲陆地卫星影像镶嵌图. 改进的镶嵌图较 LIMA 的优势体现在影像处理流程的 3 个方面: (1) DN 值饱和溢出调整采用更高精度的线性回归方法; (2) 利用每个像元的经纬度和影像中心点的拍摄时间逐像元计算太阳高度角, 提高了太阳高度角的计算精度; (3) 选择了更有效的 GS 融合方法, 将更多的波段(波段 5 和 7)加入融合产品的制作, 在南极地类识别上优势更加明显. 另外, 以 16 bit 进行存储的行星反射率产品很好的保持了冰雪表面的高辐射分辨率. 从目视效果、信息熵以及分类等方面与 LIMA 数据进行比较, 结果表明本文数据具有明显的优势.

关键词
陆地卫星
南极
冰盖
镶嵌图
遥感

随着近年来全球变化研究成为热点, 人们对南极的关注越来越多. 面积约为 1400 万平方公里的南极洲是全球纬度最高的大陆, 绝大部分地区常年被冰雪覆盖, 在全球能量平衡中起着重要的作用. 南极洲严酷的自然环境使得卫星遥感技术成为南极地表调查和研究的重要手段, 而利用卫星遥感数据进行南极洲制图是南极研究的重要基础工作.

截至目前, 国际上已开展了数次基于不同空间分辨率卫星数据的全南极洲制图工作. 1987 年第一幅全南极洲遥感影像镶嵌图问世, 它由 1980 年 10 月至 1983 年 12 月期间的 40 景 NOAA 系列卫星的 AVHRR 影像制作完成, 空间分辨率为 1 km[1]. 20 世纪 90 年代中期, 美国地质勘探局(United States Geological Survey-USGS)利用无云 AVHRR 影像对该镶嵌图进行了更新[2]. 南极洲第一幅高空间分辨率的卫星影像镶嵌图是由 1997 年 9~10 月间加拿大 RADARSAT-1 获取的 25 m 分辨率的 SAR 影像制作完成的[3]. 2005 年, 南极洲 MODIS 影像镶嵌图[4,5]制作完成, 其利用 2003 年 11 月至 2004 年 2 月期间的 260 景 MODIS 影像分别制作了 125 和 750 m 空间分辨率的镶嵌图. 2007~2008 年国际极地年期间, 国际上开展了多次基于多源卫星数据的南极洲局部地区遥感制图工作, 包括 Radarsat-2 SAR[6], ALOS PALSAR 与 ENVISAT ASAR[7]等.

中文引用格式: 惠凤鸣, 程晓, 刘岩, 等. 改进的南极洲陆地卫星影像镶嵌图. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 131–142
英文引用格式: Hui F M, Cheng X, Liu Y, et al. An improved Landsat Image Mosaic of Antarctica. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 1–12, doi: 10.1007/s11430-012-4481-5

2008 年美国地质勘探局 USGS、国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和英国南极调查局(British Antarctic Survey, BAS), 联合制作了陆地卫星影像镶嵌图(Landsat Image Mosaic of Antarctica, LIMA)[8]. 它由 1999~2003 年期间精选的 1073 景 Landsat-7 ETM+无云影像镶嵌而成, 其发布的真彩色 LIMA 产品是当前世界上南极地区最高分辨率的镶嵌图, 具有 15 m 的空间分辨率, 能较清晰的展示冰盖、冰架、快速移动的冰流、山脉等南极洲的地理特征[9~11], 有益于冰川、地质、地貌研究以及探险等科学活动. 尽管如此, 该数据仍存在一些不足, 例如它在解决镶嵌影像之间的色差问题中采用的匀光处理方法在解决色差问题的同时也在一定程度上牺牲了影像细节特征, 且使得影像灰度值失去了本身所含有的物理意义.

本研究在改进 LIMA 数据处理方法的基础上制作完成了南极洲陆地卫星影像镶嵌图. 改进的方法更好的进行了波段饱和溢出调整, 更加精确的获取了行星反射率和计算了太阳高度角, 生成的 16-bit 的反射率影像则提高了影像质量和细节纹理特征. 另外, 研究选择了更佳的多光谱波段与全色波段的融合方法, 同时考虑到 LIMA 真彩色融合影像在识别地表覆盖类型方面存在的不足, 实现 6 个波段(可见光、近红外与短波红外)的融合, 充分发挥了多种假彩色融合影像在识别南极某些地表覆盖类型方面的优势.

1 数据与方法

1.1 数据

本研究收集了 1999~2003 年期间获取的 1073 ETM+影像(http://lima.usgs.gov/access.php), 这些影像覆盖了南极洲 82.5°S 以北的地区. 获取的 ETM+影像数据已经进行了辐射与几何校正, 为 1T 级数据, 以 DN 值(8-bit)进行存储. 数据的格式是标准的 NLAPS(National Land Archive Processing System) Data Format(NDF), 投影为 WGS84/Antarctic Polar Stereographic Projection(http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/ETM). 大多数影像获取时间为南极的夏季(11 月份至次年 1 月份). 为了便于数据管理, 对影像数据进行了索引文件的建库, 选取了其中的 61 景不同太阳高度角、不同增益的无云样片用于数据的分析建模. 影像索引与 61 景样片的位置分布见图 1.

ETM+传感器是 Landsat-7 卫星上的高分辨率光谱仪, 波谱波段包括可见光近红外、短波红外和热红外. 可见光近红外波段(波段 1~4)与短波红外波段(波段 5, 7)的空间分辨率是 30 m, 热红外(波段 6)为 60 m, 全色波段(波段 8)为 15 m. ETM+数据的重访周期为 16 天. 成像增益设置有低增益与高增益两种, 根据地表覆盖特征和太阳高度角改变增益方式, 最大化利用 ETM+传感器 8-bit 的辐射分辨率.

1.2 方法

ETM+影像处理过程主要包括波段溢出调整、行星反射率计算、太阳高度角计算、非朗伯体反射率计算、影像融合和镶嵌图制作.

1.2.1 波段溢出调整

冰雪在可见光波段具有很高的反射率, 而在近红外波段反射率则很低. 冰雪在 ETM+影像波段 1 反射率最高, 波段 2~4 逐渐降低, 波段 5 和 7 最低[12~14]. 考虑冰雪的某些波段可能出现饱和现象, ETM+传感器本身根据不同的太阳高度角进行了增益设置: (1) 太阳高度角小于 19°时, 波段 1~3 设置为高增益, 大于 19°时设置为低增益(冰雪在太阳高度角大于 19°时, 波段 1 反射率大于 0.94, 波段 2 反射率大于 1.03, 波段 3 反射率大于 0.95); (2) 太阳高度角小于 31°时, 波段 4 设置为高增益, 大于 31°时设置为低增益(冰雪在太阳高度角大于 31°时, 波段 4 反射率大于 0.92); (3) 波段 5 和 7 始终设置为高增益; (4) 波段 8 始终设置为低增益(http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/ handbook/handbook_htmls/chapter6/chapter6.html). 但是, 可见光部分(波段 1~3)由于冰雪的高反射率依然会出现 DN 值饱和溢出现象, 这是影像纹理信息损失的主要原因. 因此, 进行 DN 值饱和溢出调整是改进影像质量的首要工作.

本文选取了 61 景影像作为样片评估 ETM+传感器不同波段冰雪 DN 值饱和溢出的阈值. 这 61 景样片空间位置分布均匀, 覆盖了不同太阳高度角, 且覆盖地类主要为冰雪. 61 景样片众数(即影像直方图的峰值)的散点图见图 2, 可以明显看出太阳高度角与众数值密切相关. 对于相同的太阳高度角, 众数值在不同波段中不同, 最大的是波段 1, 其次是波段 3、波段 2, 最小是波段 8. 太阳高度角大于 31°时, 波段 4

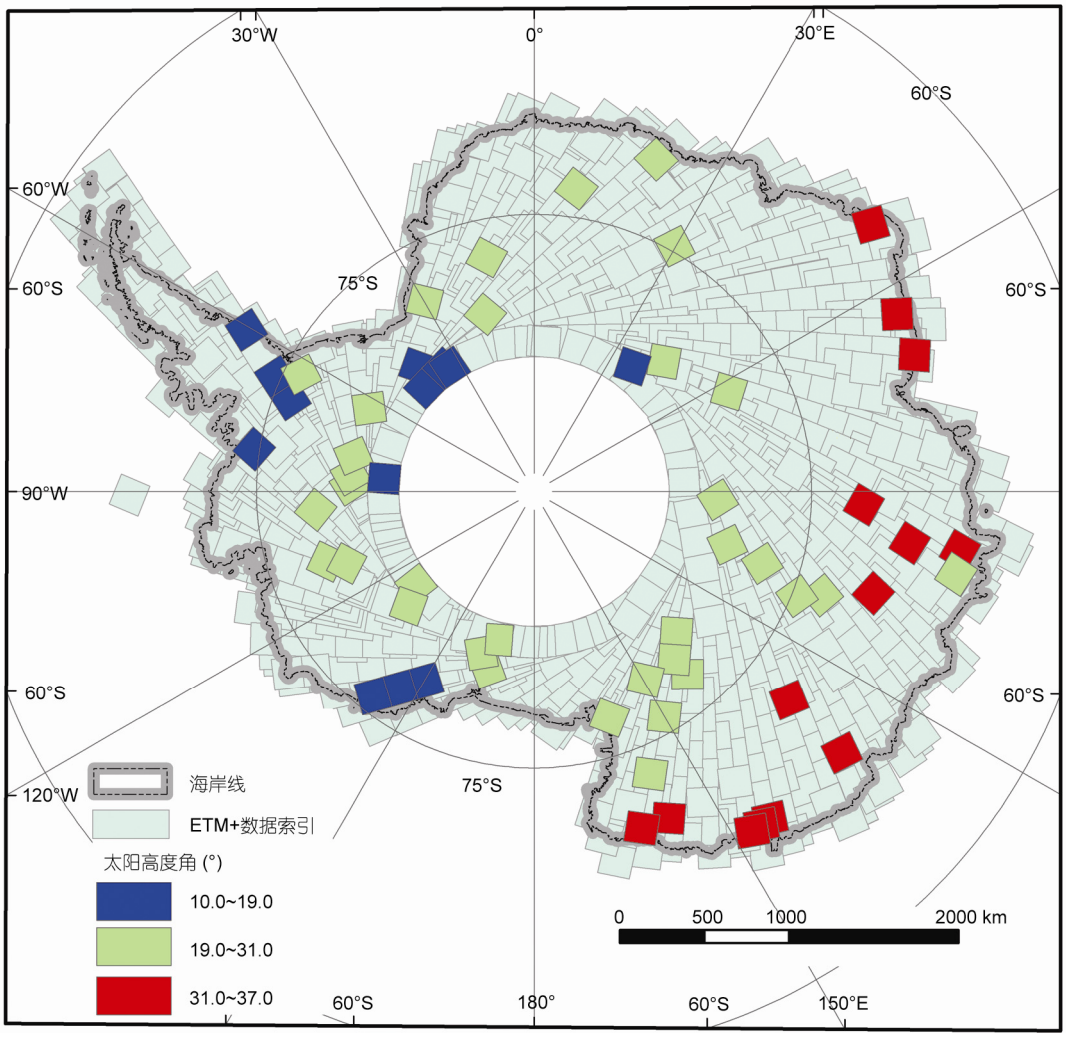


图 1　ETM+影像索引图与样片分布图

增益调整为低增益, 其众数值也远远低于波段 1~3 与波段 8. 上述特征是波段溢出调整的依据.

根据增益设置, 众数小于 255 的数据参与回归分析. 根据不同的增益设置同时进行了比值与线性回归. 具体方法: 对于波段 1 与波段 3, 如果波段 2 的 DN 值没有饱和(小于 255), 那么波段 2 的 DN 值就使用回归方程计算波段 1 与波段 3 的 DN 值, 否则使用波段 8 的 DN 值进行回归计算; 对于波段 2 和波段 4, 使用波段 8 的回归方程计算 DN 值. 表 1 与 2 是不同增益方式下采用比值与线性回归方程的结果比较. 由于 DN 为 255 时不能确定像元是否已饱和, 因此凡是众数为 255 的值的样本在回归方程中被排除, 由此表 1 与 2 中样片的数量不同. 从比较结果来看, 尽管比值与线性回归都具有很高的相关系数, 但是均方根误差表明线性回归的精度更高一些. 因此, 本研究采用线性回归进行 DN 的饱和溢出调整.

1.2.2　行星反射率计算

行星反射率(又称为大气上方反射率)消除了因数据获取日期不同引起的太阳高度角的影响, 弥补了不同波段大气上方太阳平均辐照度的差异带来的误差. 同时, 行星反射率校正了影像由于获取日期不同日地距离不同带来的误差[15]. 将 DN 值转化为行星反射率是数据具有可比性的前提.

行星反射率的计算公式采用 Landsat-7 科学数据用户手册里面的公式(http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html):

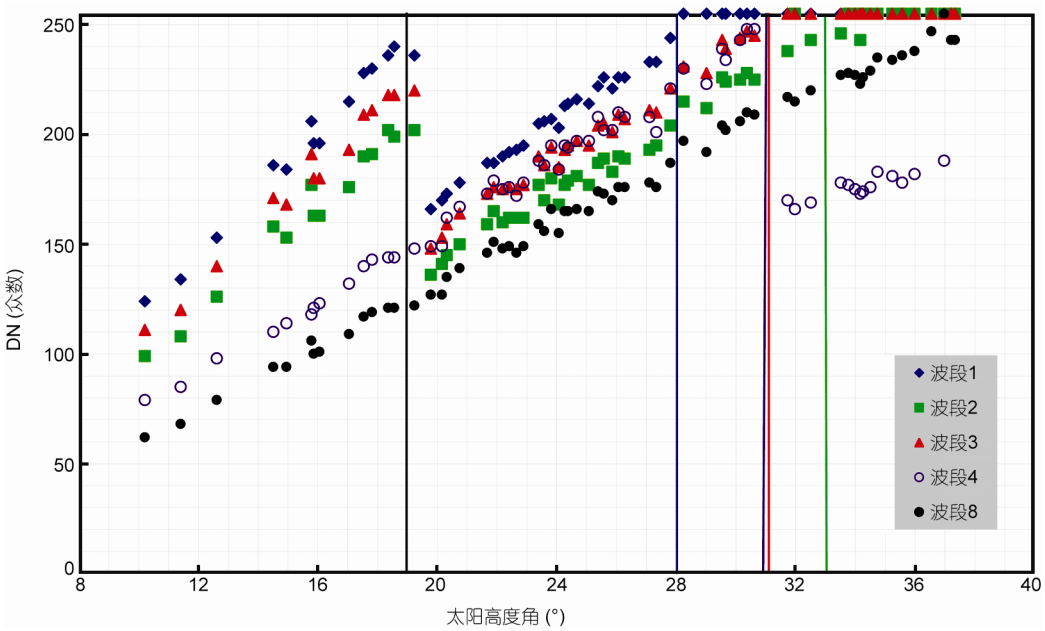


图 2　61 景样片的 DN 值众数与太阳高度角的关系

表 1　高增益时比值与线性回归方程 a)

	比值回归		线性回归		样片数
	比值	RMSE(DN)	方程	RMSE(DN)	
波段 1/波段 2	1.195	3.724	$b1$=1.126×$b2$+11.870	2.931	14
波段 3/波段 2	1.095	1.826	$b3$=1.064×$b2$+5.440	1.491	14
波段 1/波段 8	1.955	1.881	$b1$=1.921×$b8$+3.571	1.76	14
波段 2/波段 8	1.635	2.773	$b2$=1.697×$b8$−6.512	2.495	14
波段 3/波段 8	1.791	1.483	$b3$=1.811×$b8$−2.034	1.435	14
波段 4/波段 8	1.188	2.873	$b4$=1.144×$b8$+5.927	2.295	47

a) 比值与线性回归的 R^2 都是 0.99, P 值都小于 0.001

表 2　低增益时比值与线性回归方程 a)

	比值回归		线性回归		样片数
	比值	RMSE(DN)	方程	RMSE(DN)	
波段 1/波段 2	1.192	3.224	$b1$=1.189×$b2$+0.512	3.224	26
波段 3/波段 2	1.089	1.486	$b3$=1.086×$b2$+0.543	1.486	26
波段 1/波段 8	1.295	3.319	$b1$=1.287×$b8$+1.293	3.317	26
波段 2/波段 8	1.087	1.853	$b2$=1.077×$b8$+1.526	1.845	26
波段 3/波段 8	1.183	1.448	$b3$=1.176×$b8$+1.087	1.445	26
波段 4/波段 8	1.292	1.699	$b4$=1.288×$b8$+0.695	1.699	12

a) 比值与线性回归的 R^2 都是 0.99, P 值都小于 0.001

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{\mathrm{ESUN}_\lambda \cos\theta_S} = \frac{\pi(G_{\mathrm{rescale}} \cdot \mathrm{DN} + B_{\mathrm{rescale}})d^2}{\mathrm{ESUN}_\lambda \cos\theta_S}, \quad (1)$$

其中，ρ_λ为行星反射率，d 为日地距离(天文单位)，ESUN_λ为大气上方太阳平均辐照度(W (m^2 μm)$^{-1}$)，θ_S为太阳天顶角(°)，L_λ为入瞳处辐亮度(W (m^2 sr μm)$^{-1}$)，G_{rescale}为波段增益(W (m^2 sr μm)$^{-1}$)，B_{rescale}为波段偏移(W (m^2 sr μm)$^{-1}$).

每个像元入瞳处辐亮度通过公式(1)利用调整后的 DN 值和辐射增益参数计算得到(http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/

chapter11/chapter11.html)[15]. 地球是椭圆形的, 大气上方太阳平均辐照度季节变化较小, 辐照度与日地距离的平方成反比. 以天文单位为单位的日地距离由 Landsat-7 科学数据用户手册提供.

1.2.3　太阳高度角的计算

ETM+每景数据都给出了中心点的太阳高度角, 但是在南极地区, 一景 ETM+影像中经度、纬度和太阳高度角仍会有很大的变化. 本研究利用公式(2)计算了每个像元的太阳高度角, 这比 LIMA 仅使用四个角点对进行插值获取每个像元太阳高度角的方法的精度要高.

$$\sin\varphi_s=\cos\omega\cos\delta\cos\phi+\sin\delta\sin\phi, \tag{2}$$

其中, φ_s 为太阳高度角, ω为时角, δ为赤纬, ϕ为地理纬度.

1.2.4　非朗伯体反射率计算

雪在紫外到可见光波段的反照率几乎不受雪粒子大小和太阳高度角的影响, 可以达到 0.96~0.98[16,17]. 这个值可以在南极大陆使用[16]. 然而从图 3 中发现, 计算得到的雪的行星反射率达不到 0.96; 此外, 当太阳高度角大于 31°时, 行星反射率会随着太阳高度角的增加而减少, 这是由雪的非朗伯体反射引起的. 在太阳高度角很小时, 雪的反射辐射更易成为同向散射, 而前向散射在近地表发生[18,19].

本研究采用消除非朗伯体反射影响的方法进行行星反射率的计算, 使行星反射率接近真实反射率[8]. 对 61 景样片中太阳高度角小于 28°的行星反射率与太阳高度角进行曲线拟合(图 3, 表 3), 从已有文献获得标准反射率, 通过标准反射率与拟合的曲线获得比值, 该比值与行星反射率相乘获得最终结果(公式(3)). 该方法适用于南极的冰雪覆盖地区, 因为裸岩与冰雪的反射率差别很大, 该方法不适用于裸岩区, 裸岩地区仍然保有原先的行星反射率. 裸岩的数据来自南极数字数据库(Antarctic Digital Database-ADD(http://www.add.scar.org:8080/add/)), 该数据包括了南极横断山脉、查尔斯王子山与格罗夫山等. 非朗伯体调整后的行星反射率的结果乘以 10000 后以 16-bit 整型进行存储, 极大的保持了数据结果精度.

$$\rho_{\mathrm{NL}}=\rho_\lambda\times f_{\mathrm{NL}}=\rho_\lambda\times\frac{f_{\mathrm{stand}}}{f_{\mathrm{curve}}}, \tag{3}$$

ρ_{NL} 为非朗伯体行星反射率, ρ_λ为行星反射率, f_{NL} 为非朗伯体行星反射率的调整因子, f_{stand} 为标准反射率(表 3), f_{curve} 为行星反射率与太阳高度角曲线拟合方程(表 3).

1.2.5　影像融合

本研究采用 Gram-Schmidt Spectral Sharpening (GS)[20]方法对数据进行融合. GS 融合方法对同一传感器的数据能够很好的保持空间纹理信息与光谱特征[21,22]. GS 方法的原理是利用多光谱低分辨率波段模拟出一个全色波段, 对模拟出的全色波段和多光谱波段进行 Gram-Schmidt 变换, 其中模拟的全色波

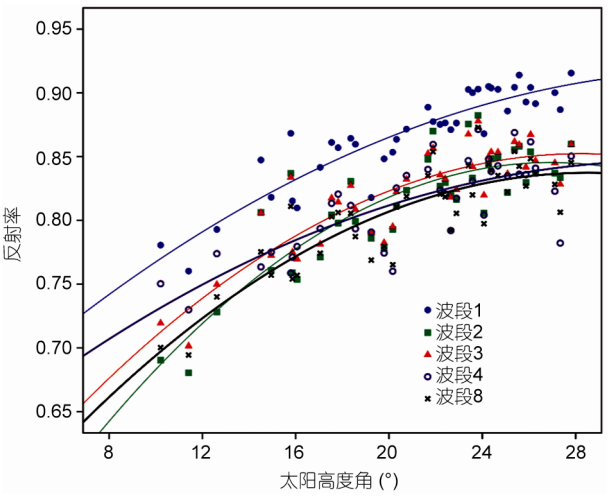


图 3　行星反射率与太阳高度角的散点图与曲线拟合图

表 3　波段 1~4 与波段 8 的行星反射率与太阳高度角曲线拟合方程与标准反射率

	曲线拟合方程	R^2	P	标准反射率
波段 1	ρ1=0.620+0.017×SE−0.00025×SE×SE	0.833	<0.001	0.9362
波段 2	ρ2=0.434+0.031×SE−0.00057×SE×SE	0.748	<0.001	0.8694
波段 3	ρ3=0.509+0.024×SE−0.00043×SE×SE	0.769	<0.001	0.8697
波段 4	ρ4=0.598+0.016×SE−0.00024×SE×SE	0.614	<0.001	0.8599
波段 8	ρ8=0.497+0.024×SE−0.00042×SE×SE	0.751	<0.001	0.8556

a) ρ, 行星反射率; SE, 太阳高度角

段被作为第一个波段; 然后, 用高空间分辨率的全色波段替换 Gram-Schmidt 变换后的第一个波段, 利用 Gram-Schmidt 反变换得到最终的融合影像. 本研究采用 ETM+ 6 个多光谱波段(波段 1~5 和 7)与全色波段进行 GS 融合, 得到了 15 m 分辨率的多波段融合数据.

1.2.6 镶嵌图制作

将上述 6 个波段 15 米分辨率的融合影像(波段 1~5 和 7)用于镶嵌. 数据镶嵌时从底层至顶层的放置顺序为: 含云数据、11 月与 3 月的数据, 12 月份至 2 月份的数据. 镶嵌后的数据量约为 980 GB, 难以形成一个独立的文件, 因此本研究利用 ENVI 软件采用虚拟镶嵌技术进行了镶嵌. 由于 Landsat-7 不能覆盖 82.5°S 以南的区域, 本文采用 MODIS 数据补缺[4], 形成完整的南极洲镶嵌图.

2 结果与讨论

南极洲彩色合成(3/2/1 和 7/4/1)的镶嵌图见图 4. 从影像目视效果、信息熵与分类精度三个方面来比较本文与 LIMA 的结果, 结果显示采用本文改进方法后的融合影像在影像纹理细节、影像质量和地表分类精度方面均优于 LIMA.

2.1 目视效果

目视判读比较 LIMA 影像与本研究影像的目视效果. 为了保证比较结果的有效性, 选择了沿着海岸线分布的 12 个 512×512 像素大小的样区进行比较(图 5). LIMA 数据来自 USGS 网站. 从图 5 中可以看出, 相对于 LIMA 影像, 本研究的真彩色合成影像(波段 3/2/1)的纹理更加清晰, 地表细节特征更加丰富. 此外, LIMA 中存在的色彩失真、锯齿边缘等问题得到了改进, 这显示出本文 DN 值调整算法与融合方法的优势.

2.2 信息熵

采用影像的标准差与信息熵定量评价影像质量[23,24]. 一幅影像的标准差通常会随着信息丰富程度的增加而增加, 这表明影像有更大的灰度级别与更好的影像质量. 考虑到两种数据不同, 本研究采用相对标准差[23]进行数据比较. 信息熵以 bit 为单位进行测量.

$$S=\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}[f(i,j)-\overline{f}]^2\Big/MN}, \tag{4}$$

S 为标准差, $f(i,j)$为第 i 行第 j 列的 DN 值, $\overline{f}$ 为 DN 值平均值, M 为影像行数, N 为影像列数.

$$H=-\sum_{i=1}^{k}P(i)\log_2 P(i), \tag{5}$$

H 为信息熵, k 为灰度级别, $P(i)$为 DN 值为 i 值的概率.

12 个样区的相对标准差与信息熵见表 4. 从表 4 看出, 本研究数据的相对标准差都大于 LIMA 的结果, 这表明本研究的数据信息丰富程度更大, 影像灰度级别更高, 影像质量更好. 在信息熵中, 本研究的大

表 4 12 个样区信息熵与相对标准差比较

样片编号	LIMA (信息熵 相对标准差)								本研究数据 (信息熵相对标准差)							
	波段 1		波段 2		波段 3		波段 4		波段 1		波段 2		波段 3		波段 4	
1	2.05	(0.58)	2.05	(0.63)	2.03	(0.67)	2.03	(0.72)	2.22	(0.60)	2.24	(0.65)	2.24	(0.69)	2.21	(0.73)
2	1.90	(0.31)	1.97	(0.34)	2.00	(0.37)	2.04	(0.41)	1.96	(0.32)	2.01	(0.36)	2.09	(0.39)	2.12	(0.41)
3	2.03	(0.46)	2.05	(0.54)	2.06	(0.59)	2.07	(0.63)	2.07	(0.50)	2.10	(0.60)	2.16	(0.68)	2.14	(0.74)
4	1.56	(0.06)	1.63	(0.07)	1.65	(0.08)	1.75	(0.09)	1.57	(0.07)	1.67	(0.08)	1.70	(0.09)	1.71	(0.1)
5	1.55	(0.2)	1.65	(0.22)	1.74	(0.23)	1.81	(0.28)	1.68	(0.22)	1.75	(0.24)	1.82	(0.26)	1.86	(0.31)
6	1.78	(0.2)	1.80	(0.22)	1.82	(0.24)	1.92	(0.26)	2.02	(0.21)	2.00	(0.23)	2.02	(0.25)	2.03	(0.27)
7	1.98	(0.27)	1.99	(0.3)	1.93	(0.31)	1.98	(0.32)	2.15	(0.28)	2.18	(0.30)	2.22	(0.31)	2.19	(0.33)
8	1.45	(0.12)	1.45	(0.13)	1.45	(0.14)	2.02	(0.19)	1.88	(0.12)	1.85	(0.12)	1.89	(0.13)	2.11	(0.19)
9	2.05	(0.35)	2.07	(0.36)	2.17	(0.37)	2.14	(0.45)	2.20	(0.40)	2.20	(0.41)	2.26	(0.42)	2.22	(0.51)
10	2.00	(0.14)	2.03	(0.16)	2.11	(0.19)	2.19	(0.28)	2.07	(0.16)	2.08	(0.18)	2.19	(0.21)	2.22	(0.31)
11	1.84	(0.24)	1.89	(0.26)	1.99	(0.27)	2.06	(0.36)	2.02	(0.65)	2.06	(0.65)	2.14	(0.61)	2.19	(0.39)
12	1.93	(0.33)	1.96	(0.35)	1.99	(0.35)	2.02	(0.35)	2.03	(0.34)	2.07	(0.36)	2.07	(0.37)	2.02	(0.36)

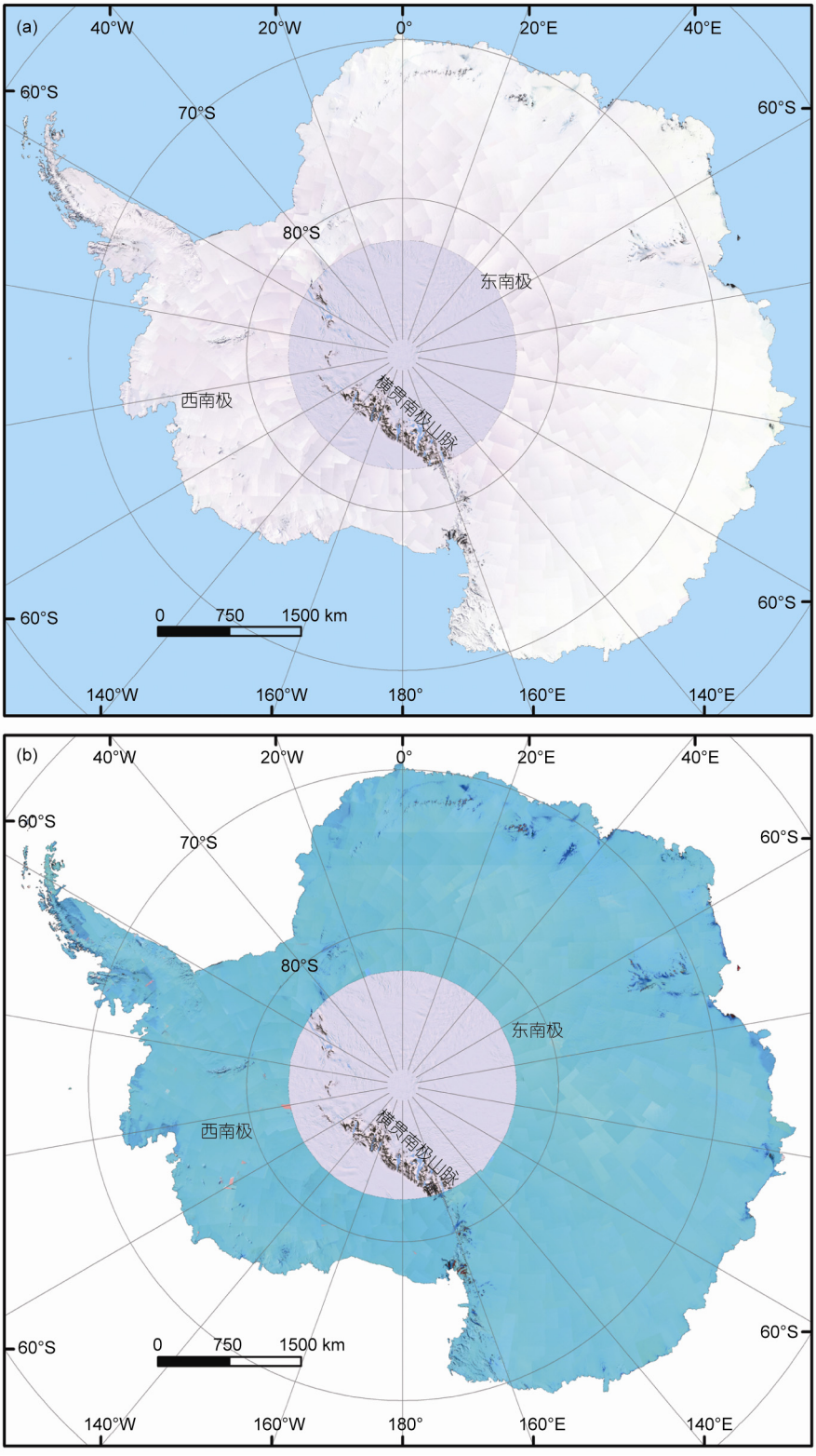
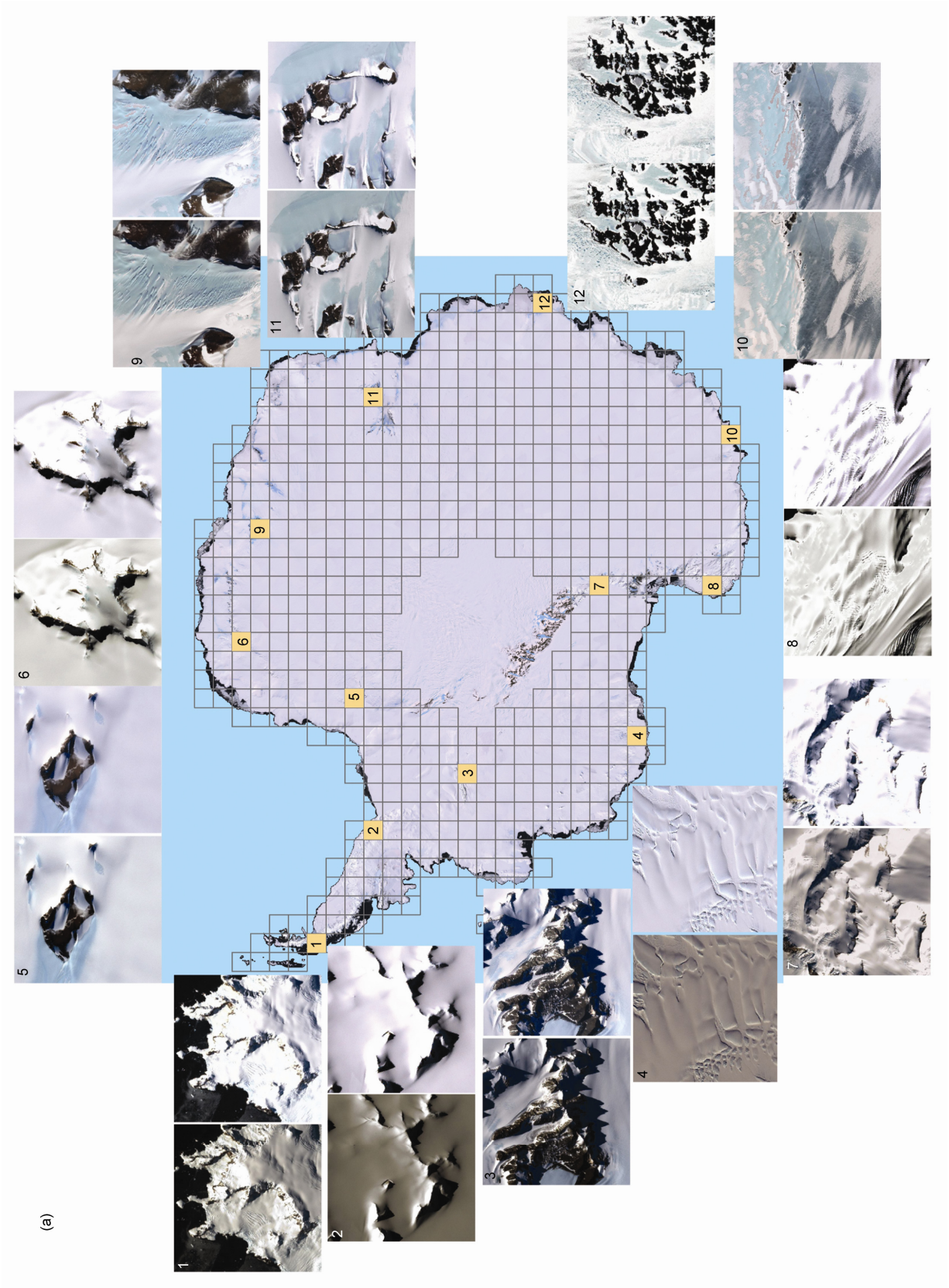


图 4　ETM+影像镶嵌图

(a) 波段 3/2/1 合成图; (b) 波段 7/4/1 合成图. 82.5°S 以南区域是 MODIS 数据


(a)

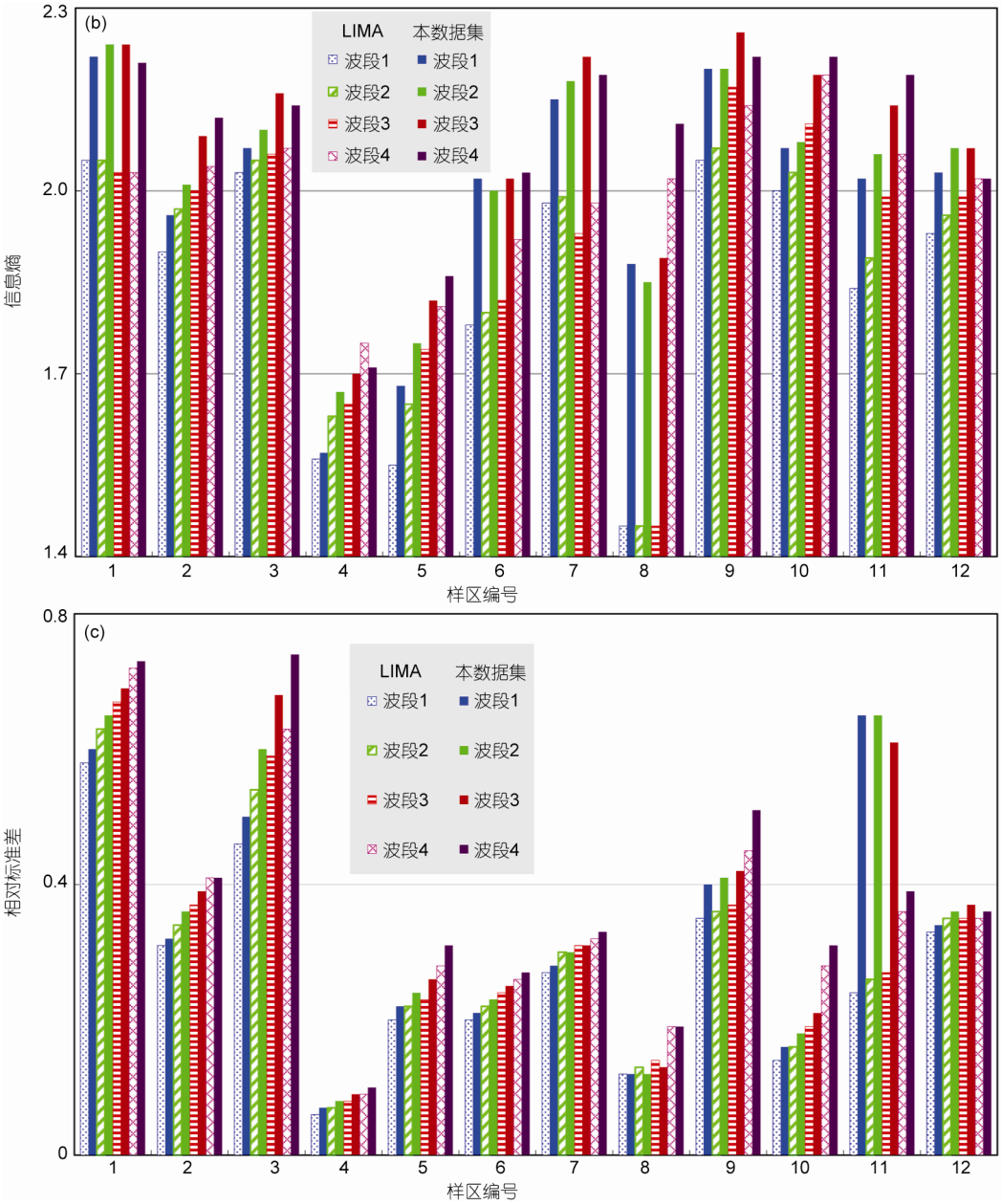


图 5　本研究数据与 LIMA 数据的 12 个样区比较图(波段 3/2/1 合成图)

(a) 左边影像是本研究影像, 右边的是 LIMA 影像; (b) 12 个样区波段 1~4 的信息熵之间的比较; (c) 12 个样区波段 1~4 的相对标准差之间的比较

部分样区的值都高于 LIMA 的结果. 12 个样区的 1~4 波段影像的比较中, 本研究数据的平均相对标准差比 LIMA 的数据分别高 7.08%, 6.23%, 7.20% 和 7.18%, 而信息熵比 LIMA 的数据分别高 7.88%, 7.45%, 8.19%和 4.11%, 数据质量较 LIMA 得到了较大的改善.

2.3　分类结果比较

遥感影像的一个重要应用是地表覆盖类型分类. 通常影像质量越高, 分类结果越好. 因此, 影像分类结果的好坏是衡量影像质量的一种方式. 本文将 ISOdata 非监督分类方法应用到本研究的两个波段组合

(波段 7/4/1 与 3/2/1)与 LIMA 的一个波段组合(波段 3/2/1), 对南极地表覆盖类型进行分类, 进而评价两种数据的质量.

图 6 显示了三个不同组合图的分类结果. 波段 7/4/1 组合的影像的分类结果是三个波段组合中最好的. 从放大的结果图 7 中, 本研究波段 3/2/1 组合的分类结果的边界较 LIMA 波段 3/2/1 的结果好. 这里利用混淆矩阵来定量评价分类精度. 基于目视解译, 生产者精度与用户精度的混淆矩阵见表 5. 结果表明, 本研究分类结果的生产者精度与用户精度都要高于 LIMA 的结果. 此外, 波段 7/4/1 组合影像对蓝冰有更高的分类精度.

表 5　样片 5, 9 和 11 不同波段组合的分类结果的混淆矩阵

	生产者精度			用户精度		
	波段 7, 4, 1	波段 3, 2, 1	波段 3, 2, 1 来自 LIMA	波段 7, 4, 1	波段 3, 2, 1	波段 3, 2, 1 来自 LIMA
粒雪	96.50	85.20	83.40	92.40	84.30	84.30
裸岩	90.40	92.20	92.00	81.00	85.00	84.80
蓝冰	88.40	79.00	78.80	97.00	82.10	79.70
合计	91.83	85.64	84.91	90.38	83.81	82.97

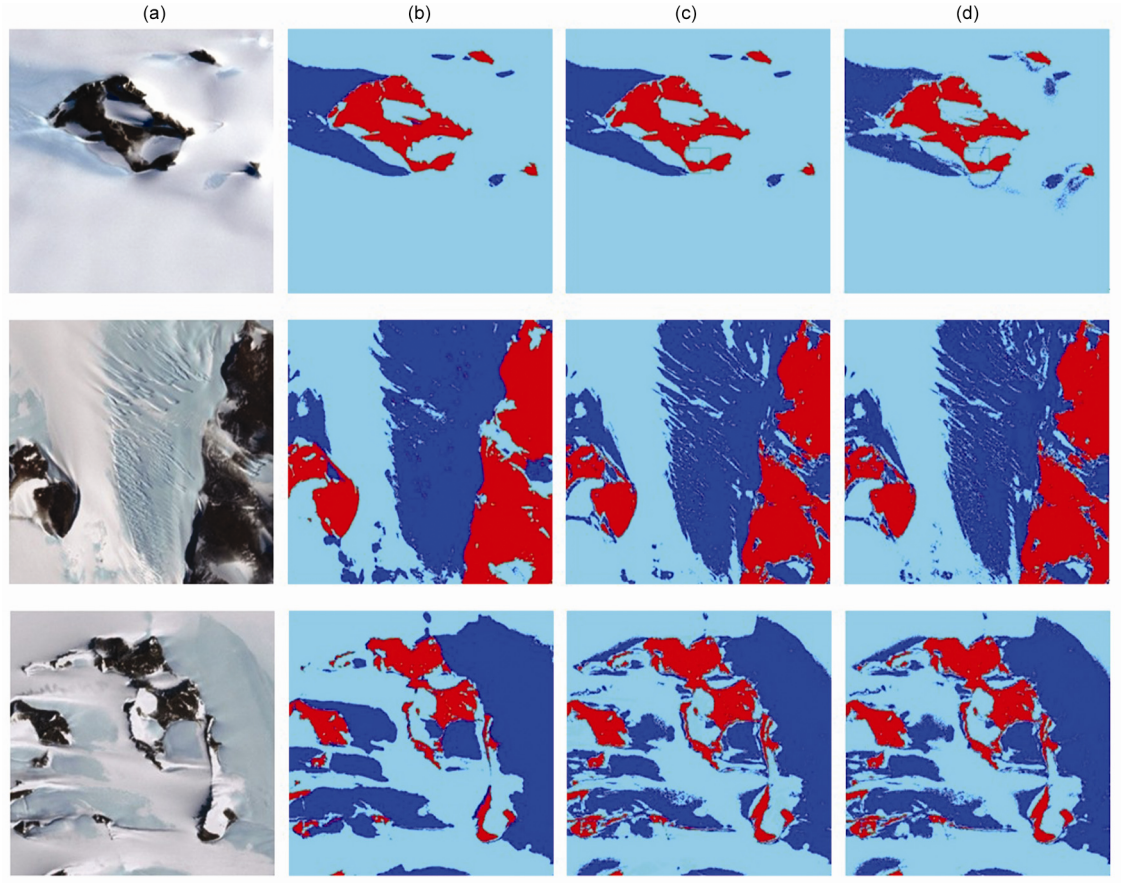


图 6　样片 5, 9 和 11 非监督分类结果

蓝色的是蓝冰, 红色的是裸岩, 青色的是粒雪. (a) ETM+波段 3/2/1 合成图; (b) 本研究波段 7/4/1 合成图的非监督分类结果; (c) 本研究波段 3/2/1 合成图的非监督分类结果; (d) LIMA 波段 3/2/1 合成图的非监督分类结果

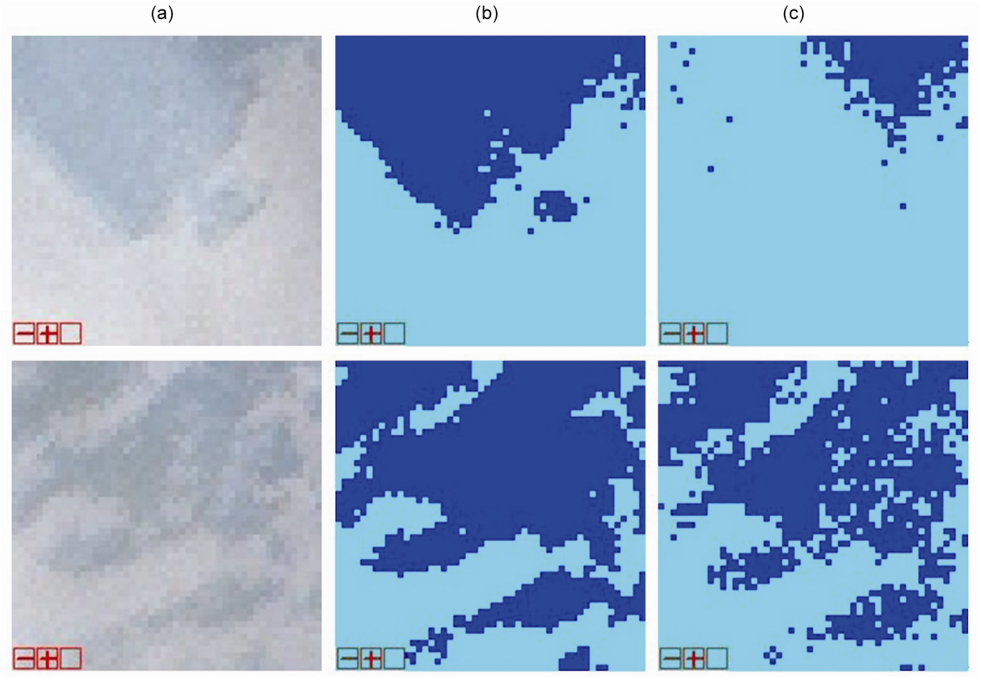


图 7　分类结果的放大图

(a) ETM+波段 3/2/1 合成图; (b) 本研究波段 3/2/1 合成图的非监督分类结果; (c) LIMA 波段 3/2/1 合成图的非监督分类结果

3　结论

本研究较 LIMA 数据处理的改进主要体现在四个方面: (1) DN 值饱和溢出调整采用的线性回归方法较 LIMA 的比值方法误差小. (2) 太阳高度角的计算, 本研究采用每个像元的经纬度、中心像元的获取时间日期进行每个像元太阳高度角的计算, 较 LIMA 仅使用四个角点的太阳高度角进行插值计算精度高. (3) 更好的融合算法. 本研究采用对空间纹理信息与光谱特征保持较好的 GS[20]方法对数据进行融合, 同时对波段 5 和波段 7 也进行了融合. 相比于 LIMA 仅对波段 1~4 采用代数运算进行融合, 本文的方法避免了融合的锯齿效应, 影像纹理特征更加精细, 地表覆盖特征展示方式更加丰富. (4) 16-bit 的行星反射率数据具有更多的纹理细节和地表特征. 这些优势在通过目视效果、信息熵、分类精度等方面的比较得到了验证, 表明本研究的数据具有更高的研究应用价值.

利用改进的 ETM+数据处理方法制作 15 m 分辨率的南极洲镶嵌图仍可以实现进一步完善: (1) 用于 ETM+正射校正的数据高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是 200 m 分辨率的 RAMP-DEM[25], 其低于 ETM+本身的分辨率. 地形校正在行星反射率计算时并未考虑, 地形引起的误差没有消除. (2) 用于减小非朗伯体效果的标准反射率应根据南极地表不同的地物特征来确定. (3) 由于缺乏大气校正所需的参数(如水汽含量、气溶胶等), 本研究忽略了大气的影响, 反射率的精度可以通过消除大气效应得到进一步提高.

致谢　美国德克萨斯农工大学迟肇惠博士与加拿大阿尔伯塔大学李海涛先生对本文进行了修改, 在此表示感谢.

参考文献

1　Merson R H. An AVHRR mosaic image of Antarctica. Int J Remote Sens, 1989, 10: 669–674

2　Ferrigno J, Mullins J, Stapleton J, et al. Satellite image map of Antarctica. Miscellaneous Investigations Series. US Geological Survey, 1996

3 Jezek K, RAMP Product Team. RAMP AMM-1 SAR image mosaic of Antarctica. Fairbanks: Alaska Satellite Facility, in association with the National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO., 2002. Digital media
4 Haran T, Bohlander J, Scambos T, et al. MODIS Mosaic of Antarctica (MOA) Image Map. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2005
5 Scambos T A, Haran T M, Fahnestock M A, et al. MODIS-based mosaic of Antarctica (MOA) data sets: Continent-wide surface morphology and snow grain size. Remote Sens Environ, 2007, 111: 242–257
6 Rigby G, Rolland P. Mapping Antarctica with RADARSAT-2. The International Polar Year Oslo Science Conference, 2010
7 Rignot E. Ice motion mapping in Antarctica with Envisat ASAR and ALOS PALSAR. Fringe 2007: Advances in SAR Interferometry from ENVISAT and ERS Missions, 2007
8 Bindschadler R, Vornberger P, Fleming A, et al. The Landsat image mosaic of Antarctica. Remote Sens Environ, 2008, 112: 4214–4226
9 Baroni C, Noti V, Ciccacci S, et al. Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. Geol Soc Am Bull, 2005, 117: 212
10 Scambos T A, Bohlander J A, Shuman C A, et al. Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. Geophys Res Lett, 2004, 31: L18402
11 Stokes C R, Clark C D. Giant glacial grooves detected on Landsat ETM+ satellite imagery. Int J Remote Sens, 2003, 24: 905–910
12 Dozier J, Green R, Nolin A, et al. Interpretation of snow properties from imaging spectrometry. Remote Sens Environ 2009, 113: S25–S37
13 Dozier J, Painter T H. Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties. Annu Rev Earth Planet Sci, 2004, 32: 465–494
14 Singh P, Singh V P. Snow and Glacier Hydrology. Heidelberger: Springer, 2001
15 Chander G, Markham B, Helder D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sens Environ, 2009, 113: 893–903
16 Grenfell T, Warren S, Mullen P. Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and near-infrared wavelengths. J Geophys Res, 1994, 99: 669–684
17 Masonis S J, Warren S G. Gain of the AVHRR visible channel as tracked using bidirectional reflectance of Antarctic and Greenland snow. Int J Remote Sens, 2001, 22: 1495–1520
18 Winther J G. Short-and long-term variability of snow albedo. Nord Hydrol, 1993, 24: 199–212
19 Warren S, Brandt R, Hinton P. Effect of surface roughness on bidirectional reflectance of Antarctic snow. J Geophys Res, 1998, 103: 25789–25807
20 Laben C A, Brower B V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. UAS Patent, 6011875, 2000-01-04
21 Klonus S, Ehlers M. Image fusion using the ehlers spectral characteristics preservation algorithm. GISci Remote Sens, 2007, 44: 93–116
22 Li C, Liu L, Wang J, et al. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information (in Chinese). J Image Graph, 2004, 19: 1376–1385
23 Zhang X C, Huang Z C, Zhao Y H. Digital Remotely Sensed Image Processing (in Chinese). Hanzhou: Zhejiang University Press, 2003
24 Shannon C E. A mathematical theory of communication. Bell System Techn J, 1948, 27: 379–423
25 Liu H, Jezek K, Li B, et al. Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model. Version 2. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2001